

ROZKŁAD STRUMIENIA POWIETRZA W OGRZEWANYM PODGRZEWANYM POWIETRZEM PODŁOŻU OGRODNICZYM W USTALONYM STANIE WYMUSZONEGO NAWIEWIANIA

Sławomir Kurpaska

Katedra Mechanizacji Rolnictwa, Akademia Rolnicza im. H. Kołłątaja w Krakowie

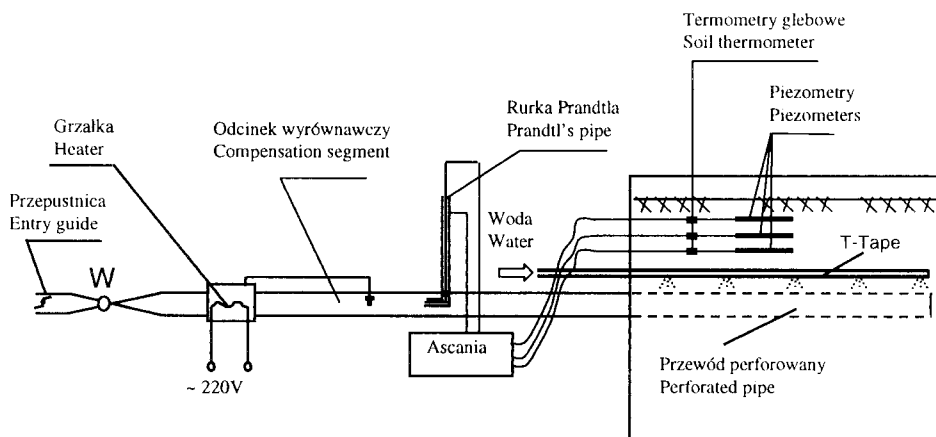
Wstęp

Jednym ze sposobów utrzymania w podłożu szklarniowym optymalnej temperatury (zależnej od rodzaju i fazy rozwojowej uprawianych roślin) jest jego ogrzewanie przy pomocy podgrzanego powietrza. W takim systemie ogrzewania podgrzane powietrze jest dostarczane do podłoża przy pomocy perforowanych rur, ułożonych na pewnej głębokości. Badania laboratoryjne wykazały, że uprawiane rośliny, w porównaniu z roślinami uprawianymi na nieogrzewanym podłożu, cechuje szybszy przyrost, lepsza jakość oraz wzrost zdrowotności [BOULARD i in. 1989; GENT, MALERBA 1994]. Istnieją również prace analizujące zachodzące procesy w ogrzewanym podłożu przy pomocy podgrzanego powietrza [KURPASKA 2000]. Podczas ogrzewania, oprócz procesów wymiany ciepła i masy w podłożu, występuje proces nawiewiania jego przestrzeni glebowej, w wyniku czego zachodzi zastępowanie powietrza glebowego podgrzanyim powietrzem atmosferycznym. W procesie nawiewiania środowiska glebowego zachodzi spadek ciśnienia powietrza przepływającego przez porowate podłoże. Spadek ten jest konsekwencją oporów przepływu. Straty ciśnienia powietrza przepływającego przez substancję porowatą były tematem intensywnych prac badawczych, chociaż dotyczyły innych zagadnień jak: doboru wentylatora w procesie suszenia nasion lub określenia spadku ciśnienia w ciałach porowatych (skałach) przy przepływie wody lub gazów kopalnianych. I tak, KAMIŃSKI i in. [1978]; PABIS [1978]; KUMAR i MUIR [1986]; PEROŃ i ZDROJEWSKI [1997] analizowali opory przepływu powietrza przez warstwę nasion. W wyniku badań stwierdzono, że spadek ciśnienia zależy od prędkości pozornej przepływu powietrza, wysokości warstwy nasion, stanu fizycznego i niejednorodności średnicy cząstek suszonych nasion, nadciśnienia w wentylatorze oraz od kierunku dostarczania podgrzanego powietrza do silosu. Z kolei RAJTAR [1985]; SIEMEK i STOPA [1986] badali zagadnienia dyspersji gazów kopalnianych. Autorzy stwierdzili, że zagadnienia te można opisać przy pomocy modeli matematycznych, w których uwzględnili przemiany termodynamiczne gazu, zaś w konkluzji stwierdzili, że wpływ temperatury gazu na rozkład ciśnienia jest niewielki i w praktycznych obliczeniach może być pomijany.

Z literatury przedmiotu wynika, że szacowanie napowietrzania podłoża na drodze teoretycznych rozważań może, ze względu na złożoność struktury wewnętrznej ciał kapilarno-koloidalno-porowatych i ich różnorodności, być obarczone błędem. Przedstawione wyniki badań różnych autorów dowodzą bowiem, że występujące podczas ruchu powietrza opory przepływu zależą nie tylko od rodzaju materiału, sposobu zasilania czy też od miąższości warstwy badanych materiałów, ale również od ich stanu fizycznego. Niezbędne jest więc przeprowadzenie szczegółowej analizy, mającej na celu określenie zmian napowietrzania w podłożu. Celem pracy jest określenie zmian w napowietrzaniu podłoża przy ustalonych warunkach relacji pomiędzy ilością powietrza dostarczanego przez wentylator do podłoża a szerokością elementu napowietrzanego, jego temperaturą oraz wilgotnością.

Materiał i metoda

Pomiar ciśnienia hydrodynamicznego w podłożu wykonano w trzech powtórzeniach za pomocą zaprojektowanych piezometrów. Badania przeprowadzono w kanale glebowym (rys. 1), którego długość, szerokość i wysokość wynosiły odpowiednio: $1,0 \times 1,12 \times 0,7$ m, wypełnionym podłożem ogrodniczym. Podłoże składało się z mieszaniny torfu, kory drzewnej i perlitu w objętościowej proporcji odpowiednio: 0,66:0,32:0,02. W kanale umieszczono na głębokości 30 cm perforowany przewód, którym dostarczano do podłoża podgrzane powietrze. Sondy pomiarowe umieszczono w środku długości na głębokościach 5; 15 i 25 cm oraz następujących odległościach od osi przewodu perforowanego: 0; 0,14; 0,28; 0,42 i 0,56 m. Dodatkowo w 1/3 długości kanału glebowego umieszczono oporowe termometry glebowe w identycznych jak piezometry odległościach od osi przewodu glebowego.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 1. Scheme of a laboratory stand

Do pomiaru ciśnienia powietrza w przewodzie stosowano rurkę Prandtla, zaś jego strumień mierzono standardowymi metodami [ORZĘCHOWSKI i in. 1997].

Zarówno piezometry jak i rurka Prandtla zostały podłączone do mikromanometru Ascania, w którym bezwzględny błąd pomiaru ciśnienia nie przekraczał 0,5 Pa. W kanale glebowym podłączono instalację uzupełniania wody w podłożu (system sterujący procesem nawadniania wraz z przewodem nawodnieniowym typu T-Tape) wraz z układem monitorującym masę zużytej wody. W celu utrzymania zadanej temperatury podgrzanego powietrza, w odcinku wyrównawczym zainstalowano system sterowania pracą grzałki elektrycznej. Analizowano wpływ objętości i temperatury podgrzanego powietrza na zmiany napowietrzania podłoża w kanale glebowym oraz poprzeczny rozkład temperatury.

Badania przeprowadzono dla podłoża o wilgotności z przedziału wody łatwo dostępnej. Dysponując zmierzonymi wartościami ciśnienia hydrodynamicznego w podłożu oraz wartością współczynnika filtracji obliczono strumień powietrza docierający do podłoża. Zastosowano następującą procedurę: szerokość analizowanej warstwy podłoża podzielono na obszary przystające z umieszczonymi w ich osi symetrii zmierzonymi wartościami ciśnienia hydrodynamicznego. Następnie obliczono strumień powietrza docierający do poszczególnych warstw. Do określenia strumienia powietrza wykorzystano prawo Darcy'ego w postaci:

$$q = \frac{k}{\rho \cdot g} \cdot F \frac{dP}{dy}, \quad (1)$$

gdzie:

- q – strumień powietrza ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- k – współczynnik filtracji ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
- ρ – gęstość powietrza ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
- g – przyspieszenie ziemskie ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),
- F – powierzchnia przegrody (m^2),
- P – ciśnienie hydrodynamiczne powietrza (Pa),
- y – odległość między punktami a poboczną przewodu perforowanego (m).

W obliczeniach wykorzystano prawo Darcy'ego, bowiem z przeprowadzonej analizy [KURPASKA 2000] wynika, że ta zależność najlepiej opisuje zmianę ciśnienia powietrza przy jego przepływie przez porowatą przestrzeń podłoża. Wartości współczynnika filtracji (k) w funkcji wilgotności podłoża oraz ilości i temperatury powietrza wyznaczono niezależnie w kolumnie glebowej, zaś odległość między punktami a poboczną przewodu perforowanego określono wykorzystując zależności trygonometryczne. W celu sprawdzenia poprawności przyjętej metodyki dokonano porównania strumienia powietrza docierającego do podłoża ze strumieniem powietrza dostarczonym przez wentylator.

Wartość ciśnienia powietrza, po uwzględnieniu strat miejscowych i liniowych, na brzegu przewodu określano wykorzystując standardowe metody stosowane w dynamice płynów.

Względne różnice w napowietrzaniu podłoża (ε) między elementem znajdującym się w osi kanału (q_{osi}) a elementem oddalonym od osi symetrii (q_{el}) obliczono ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{osi}} - q_{\text{el}}}{q_{\text{osi}}} \cdot 100. \quad (2)$$

Do określenia związku między wymaganym ciśnieniem na brzegu przewodu perforowanego a szerokością napowietrzanego elementu wykorzystano estymację nieliniową metodą quasi-Newtona przy zachowanym współczynniku zbieżności na poziomie 0,001.

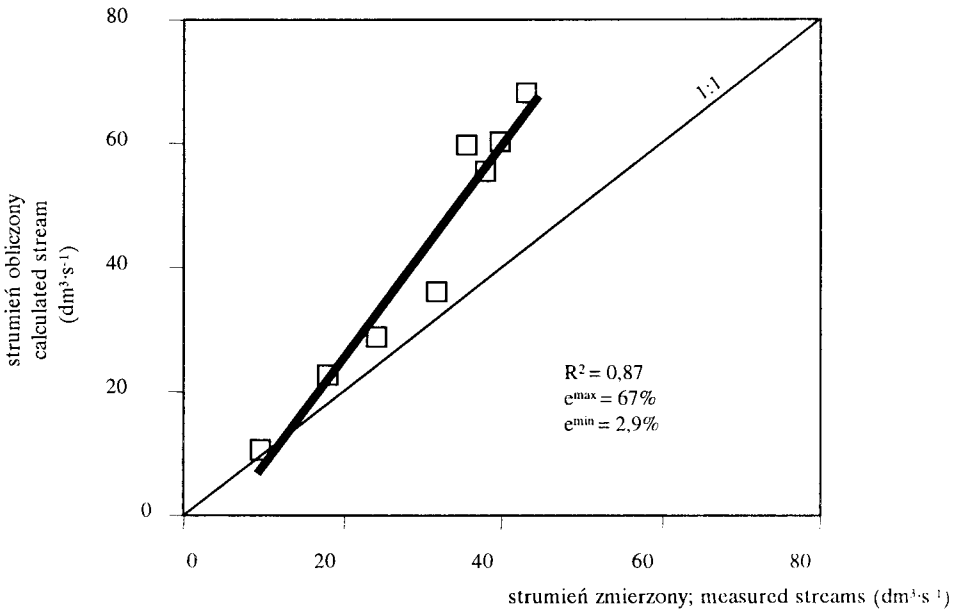
Badania przeprowadzono dla następujących parametrów wejściowych:

- wilgotność podłoża: $\theta = 0,33 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,
- strumień powietrza: $15,9 \leq q_{\text{went}} \leq 43,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- temperatura powietrza: $28 \leq t_p \leq 42^\circ \text{C}$,
- współczynnik filtracji: $k = 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Do badań wykorzystano standardowy przewód o symetrycznej perforacji poboczniczy powszechnie wykorzystany m.in. w praktyce melioracyjnej.

Wyniki i dyskusja

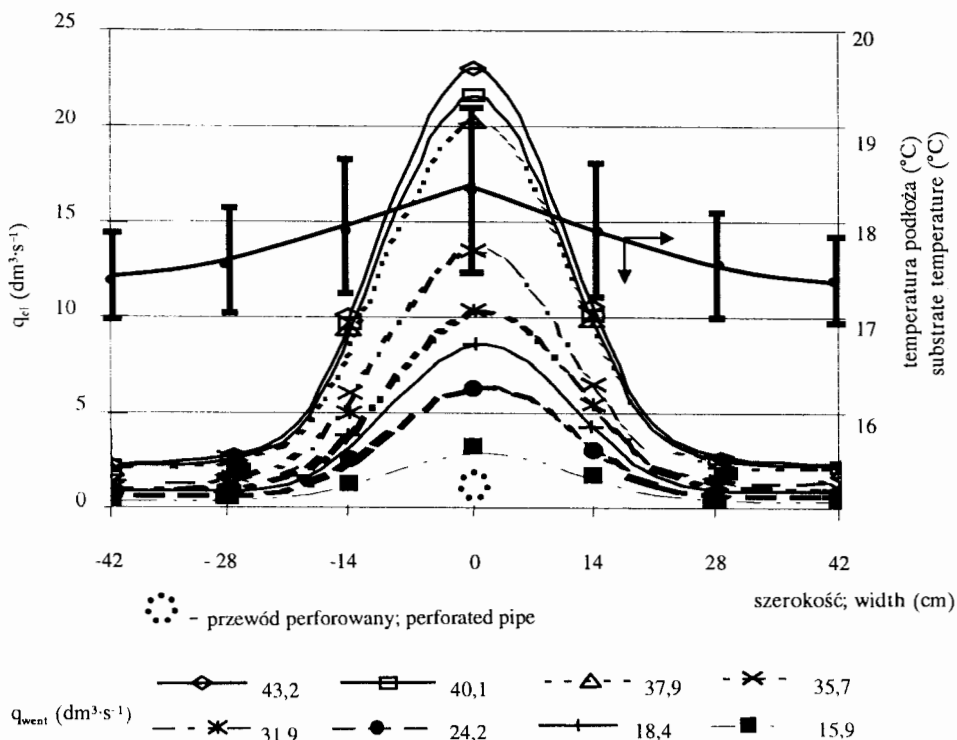
Na rys. 2. przedstawiono porównanie między obliczonym i zmierzonym strumieniem powietrza docierającego do podłoża. Obliczony maksymalny (e^{max}), minimalny (e^{min}) oraz współczynnik determinacji (R^2) pozwala stwierdzić, że przyjęta metodyka szacowania napowietrzania podłoża jest poprawna.



Rys. 2. Porównanie zmierzonego i obliczonego strumienia powietrza w podłożu
Fig. 2. Calculated and measured air streams in the substrate

Ponieważ zastosowana metodyka została zweryfikowana, na rys. 3 przedstawiono różnice w napowietrzaniu podłoża dla różnych strumieni powietrza dostarczanych przez wentylator. Można zauważyć, że ilość powietrza docierająca do elementu podłoża o szerokości równej 14 cm, znajdującego się bezpośrednio nad

osią perforowanego przewodu, w zależności od strumienia wytwarzanego przez wentylator, mieści się w granicach od $2,9 \text{ dm}^3\text{-s}^{-1}$ (przy wydajności wentylatora $15,9 \text{ dm}^3\text{-s}^{-1}$) do ok. $23 \text{ dm}^3\text{-s}^{-1}$ (wydajność $43,2 \text{ dm}^3\text{-s}^{-1}$). Z kolei maksymalne różnice w ilości docierającego powietrza do elementów podłoża, liczone względem wartości maksymalnej, wynoszą od ok. 38 do 93%. Wartości względnych różnic są porównywalne dla różnych wydajności wentylatora. Dodatkowo zaznaczono poprzeczny rozkład średniej temperatury w podłożu na głębokości 15 cm wraz z odchyleniami od średniej jako konsekwencja zróżnicowanej temperatury i strumienia podgrzanego powietrza. Jak można zauważyć, temperatura podłoża w punktach pomiarowych zmieniała się od $16,5^\circ\text{C}$ (punkt oddalony od osi symetrii przewodu o 42 cm; temperatura powietrza 28°C , strumień $15,9 \text{ dm}^3\text{-s}^{-1}$) do $24,4^\circ\text{C}$ (punkt w osi symetrii, temperatura powietrza 42°C , strumień $43,2 \text{ dm}^3\text{-s}^{-1}$). Niezbędna do utrzymania stałej wilgotności podłoża masa wody, w przeliczeniu na jednostkową długość kanału zmieniała się od $0,45 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ bieżący przewodu (temperatura powietrza 28°C , strumień $15,9 \text{ dm}^3\text{-s}^{-1}$) do $1,8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ bieżący przewodu (temperatura powietrza 42°C , strumień $43,2 \text{ dm}^3\text{-s}^{-1}$).

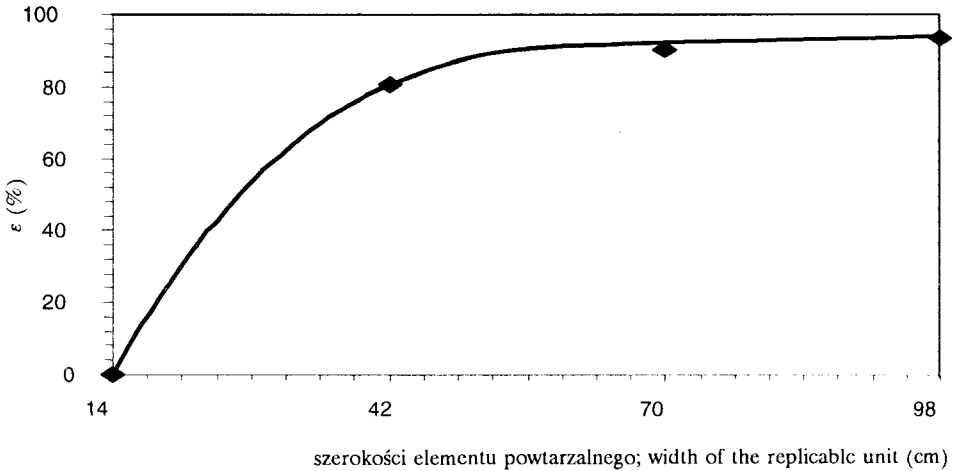


Rys. 3. Rozkład strumienia powietrza i temperatury w płaszczyźnie przekroju poprzecznego napowietrzanej warstwy

Fig. 3. Distribution of the air stream and temperature in the cross cutting plane of aeration layer

Na rys 4. przedstawiono względne zmiany w napowietrzaniu warstwy podłoża w zależności od przyjętej szerokości elementu powtarzalnego. Element powtarzalny instalacji odpowiada odległości między osiami symetrii przewodów grzej-

nych umieszczonych w rzeczywistym obiekcie. Element taki zawiera więc w swojej osi symetrii perforowany przewód, tym samym całą analizowaną przestrzeń podłoża można wypełnić podobszarami przystającymi do tego elementu z przyjętymi warunkami izolacyjności na jego brzegach. Interpretacja uzyskanego przebiegu jest następująca. Jeśli szerokość elementu powtarzalnego instalacji, która dostarcza podgrzane powietrze do podłoża będzie wynosić 14 cm, to względne różnice (obliczone ze wzoru 2) są równe zero, zaś jeśli szerokość elementu powtarzalnego wynosić będzie 98 cm, to względne różnice wynosić będą 93%.



Rys. 4. Względne zmiany w napowietrzaniu warstwy podłoża w zależności od szerokości elementu powtarzalnego instalacji

Fig. 4. Changes in the relative aeration of substrate layer as function of the width of the replicable unit of installation

Do wyznaczenia zmian w napowietrzaniu podłoża przeanalizowano kilka możliwych zależności, kierując się współczynnikiem R^2 , e^{\max} , e^{\min} oraz średnim błędem kwadratowym. Najlepszą zgodność między wartościami aproksymowanymi a zmierzonymi znaleziono dla wielomianu 2-go stopnia w postaci:

$$q_{el} = a_1 q_{went}^2 + a_2 q_{went} + a_3 s^2 + a_2 s + a_0 \quad (3)$$

Współczynniki (stałe) przybierają wartość: $a_1 = 4,8 \times 10^{-3}$; $a_2 = -0,045$; $a_3 = 0,013$; $a_4 = -0,82$; $a_0 = 9,17$,

przy: $R^2 = 0,98$; $\sigma = 2,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $e^{\max} = 68\%$, $e^{\min} = 1,2\%$; w zakresie stosowania: $18 \leq q_{went} \leq 44 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $0 \leq s \leq 42 \text{ cm}$,

gdzie s – współrzędna pozioma na kierunku między osią symetrii przewodu perforowanego a analizowanym punktem (cm).

Analiza wariancji wykazała statystyczną istotność wpływu analizowanych zmiennych niezależnych na napowietrzanie podłoża.

Przebieg zaobserwowanych zależności (zmiana napowietrzania w przestrzeni podłoża, zmiana napowietrzania uzależniona od wydatku wentylatora) można wyjaśnić następująco. Przepływające przez porowatą strukturę podłoża podgrzane

powietrze znajduje się w zasięgu działania sił pochodzących z powierzchni fazy stałej (siły adhezji, Londona-van der Waalsa, siły wiązań wodorowych). Wzajemna interakcja powoduje zmiany w przepuszczalności podłoża (zmiana wartości współczynnika filtracji k). Wynika to ze skomplikowanej budowy struktury gleby, bowiem jest ona zbudowana z wielu stałych składników (mineralnych i organicznych), w dodatku ułożonych nieregularnie. W konsekwencji pojawiają się opory przepływu, a te z kolei wpływają na zróżnicowanie ilości powietrza docierającego do porowatej przestrzeni podłoża.

Wnioski

1. Wymuszony strumień napowietrzający umieszczone w kanale podłoże ogrodnicze można wyrazić wielomianem 2-go stopnia, którego współczynniki zależą od parametrów nadmuchu, szerokości kanału oraz wilgotności podłoża.
2. W badanych warunkach eksperymentu, maksymalne różnice w ilości docierającego powietrza do elementów podłoża, liczone względem wartości maksymalnej, wynoszą od ok. 38 do 93%.

Literatura

BOULARD T., RAZAFINJOHANY E., BAILLE A. 1989. *Heat and water vapour transfer in a greenhouse with an underground heat storage system. Part I. Experimental results.* Agric. and Forest Meteor. 45: 175–184.

GENT M.P.N., MALERBA V. 1994. *Heating soil with hot air improves early yield and quality of greenhouse tomatoes.* J. Am. Soc. for Hort. Tech. 4(3): 277–281.

KAMIŃSKI E., CENTKOWSKI S., ZDROJEWSKI Z. 1978. *Opory przepływu powietrza przez warstwę ziarna kukurydzy.* Roczn. Nauk Rol., Ser. C 73(2): 75–85.

KUMAR A., MUIR W.E. 1986. *Airflow resistance of wheat and barley affected by airflow direction, filling method and dockage.* Transactions of the ASAE 29(5): 1423–1426.

KURPASKA S. 2000. *System ogrzewania podłoża ogrodniczego ciepłym powietrzem. Analiza teoretyczna i weryfikacja eksperymentalna.* Rozpr. habilit., Zeszyty Naukowe AR w Krakowie 269: 126 ss.

ORZECHOWSKI Z., PRYWER J., ZARZYCKI R. 1997. *Mechanika płynów w inżynierii środowiska.* WN-1, Warszawa: 590 ss.

PABIS J. 1978. *Opory przepływu powietrza przez warstwę niektórych nasion roślin warzywnych.* Roczn. Nauk Rol., Ser. C 73(2): 121–127.

PEROŃ S., ZDROJEWSKI Z. 1997. *Opory przepływu powietrza przez warstwę mieszaniny kul inerty i ziarna w cylindrycznej komorze suszenia.* Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 445: 245–256.

RAJTAJ J. 1985. *Analiza zjawisk dyfuzji i dyspersji gazów w ośrodkach porowatych w oparciu o modele teoretyczne.* Praca doktorska, AGH.

SIEMEK J., STOPA J. 1986. *O pewnym rozwiązaniu analitycznym równania dyspersji dla przepływu dwóch mieszających się płynów w ośrodku porowatym.* Archiwum Górnictwa 31(1): 19–35.

Słowa kluczowe: podłoże, powietrze, napowietrzanie

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań nad przestrzennym rozkładem wymuszonego strumienia powietrza (o temperaturze 28–42°C) w warstwie podłoża ogrodniczego (mieszanki: torfu, kory drzewnej i perlitu) o wilgotności 0.33 cm³·cm⁻³. Do oszacowania zmian w napowietrzaniu wykorzystano prawo Darcy'ego. Przedstawiono również równanie korelacyjne do określania napowietrzania podłoża w zależności od ilości dostarczanego powietrza oraz odległości punktów podłoża od osi symetrii przewodu perforowanego.

DISTRIBUTION OF THE AIR STREAM IN THE HEATED SUBSTRATE BY WARM AIR DURING STEADY EXTORTED AERATION

Sławomir Kurpaska

Department of Agricultural Engineering, Agricultural University, Kraków

Key words: greenhouse substrate, air, aeration

Summary

The paper presents research results concerning spatial distribution of an extorted stream of air (temperature 28–42°C) within the horticulture substrate layer (mixture of peat, tree bark and perlite) of 0.33 cm³·cm⁻³ water content. For approximation of the aeration changes Darcy's law was used. The equation of correlation determining substrate aeration in dependence on the supplied air and the distance of the points on substrate from the symmetry axis of a perforated pipe was also presented.

Dr hab. Sławomir **Kurpaska**
Katedra Mechanizacji Rolnictwa
Akademia Rolnicza im. H. Kołłątaja
ul. Balicka 104
30-149 KRAKÓW
e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl